

20T 超伝導マグネットを用いたテラヘルツジャイロトロンの開発

Development of Tera Hertz Gyrotron Using 20 T Superconducting Magnet

小菅幸介¹, 池田亮介¹, 小川 勇¹, 出原敏孝¹, 立松芳典¹, 斉藤輝雄¹
印牧知廣¹, La Agusu², M. Thumm³

*K. Kosuga¹, R. Ikeda¹, I. Ogawa¹, Y. Tatematsu¹, T. Idehara¹, T. Saito¹,
T. Kanemaki¹, La Agusu², M. Thumm³*

¹ 福井大学遠赤外領域開発研究センター

² ハルオレオ大学

³ カールスルーエ研究センターパルス出力マイクロ波研究所

¹*Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui*

²*Haluoleo University*

³*Institute for Pulsed Power and Microwave Technology (IHM)*

Abstract

High frequency gyrotrons (Gyrotron FU series) have been developed in the FIR-FU. To obtain 1 THz, higher magnetic field intensity (almost 18.6 T) is required for a second harmonic operation. The first breakthrough of 1 THz gyrotron oscillation was obtained by operating at second harmonic. Similar results was obtained in IAP-RAS. The output was produced in a short pulse and the repetition rate is too low. Such a radiation is not suitable for the application of high power technologies. We have developed Gyrotron FU CW III using a 20 T superconducting magnet. The gyrotron tube consists of a triode electron gun, gun coils around the electron gun for adjusting the beam injection radius, a sapphire window and a cavity. The cavity is a simple cylinder and that of the radius and the length are 1.95 mm and 10 mm, respectively.

Fundamental and second harmonic outputs were measured by a pyro-electric detector. The combination of the pyro-electric detector and a high-pass filter was effective in measuring second harmonic radiations. The diameter of the aperture is 0.3 mm and the cutoff frequency is almost 586 GHz. In the field intensity region higher than 19 T, several radiation signals were observed. Frequency of some radiations exceed 1 THz.

1. はじめに

ミリ波、サブミリ波領域の電磁波は、プラズマ散乱計測、材料開発、生命科学など様々な分野に用いられており、近年、電子スピン共鳴分光法 (ESR spectroscopy) や動的核偏極-核磁気共鳴分光法 (DNP-NMR spectroscopy) への展開に注目が集まっている^[1,2]。この領域における光源としては、ジャイロトロン以外に、ガン発振器、後進波管 (BW0)、遠赤外分子レーザー、自由電子レーザー (FEL) などがある。ガン発振器や BW0 は、コンパクトで、取り扱いが容易であるが、得られる出力は数 mW 程度に限られている。遠赤外分子レーザーは、媒質の選択により、様々な周波数の発振が得られ、プラズマ計測への応用を目指した開発が進められ、高安定動作も可能になっている。しかし、装置は比較的大きく、得られる出力は数 100 mW 程度である^[3]。一方、FEL は高出力が得られるものの、装置は巨大で、きわめて限られた場合にしか利用できない。

ところで、ジャイロトロンは、高出力化と高周波化に適しており、ミリ波帯では、プラズマ加熱のための高出力光源として、単管あたり 1 MW を超える出力が得られるものが開発されている^[4]。ジャイロトロンがもつ高周波化を生かす開発も進み、17 T 超伝導マグネットを用いたジャイロトロンにより、二次高調波動作を実現し、周波数 889 GHz、出力 0.1 kW の発振がパルス幅数 ms で得られた^[5]。

さらなる高周波発振のため、より高磁場を発生できる 21 T のパルスマグネットが製作され、二次高調波動作を実現し、1.01 THz の発振が達成された。また、ロシア科学アカデミーでは、40 T のパルスマグネットを用いたジャイロトロンが開発され、基本波動作の実現により、1.02 THz の発振を実現した^[6-9]。しかし、発振幅は数 10 μ s から数 ms の長短パルスであり、繰り返しも数分から数 10 分に 1 回と限られるため、光源としての実用化には適していない。そこで、テラヘルツ領域における実用光源を目指し、20 T 超伝導マグネットを用いたジャイロトロン (テラヘルツジャイロトロン) が製作された^[10~12]。テラヘルツジャイロトロンの共振器の半径は、1.95 mm、長さは、10 mm となっている。共振器半径が小さいことから、高磁場領域においても、各発振モードの磁場強度に対する間隔が広くなり、二次高調波の単独発振が期待される。

2. テラヘルツジャイロトロン

テラヘルツジャイロトロンの断面図及び外観を図 1 に載せる。この装置は、マグネ

トロン入射型電子銃 (FU 01)、補助磁場コイル、クライオスタット、20 T 超伝導マグネ

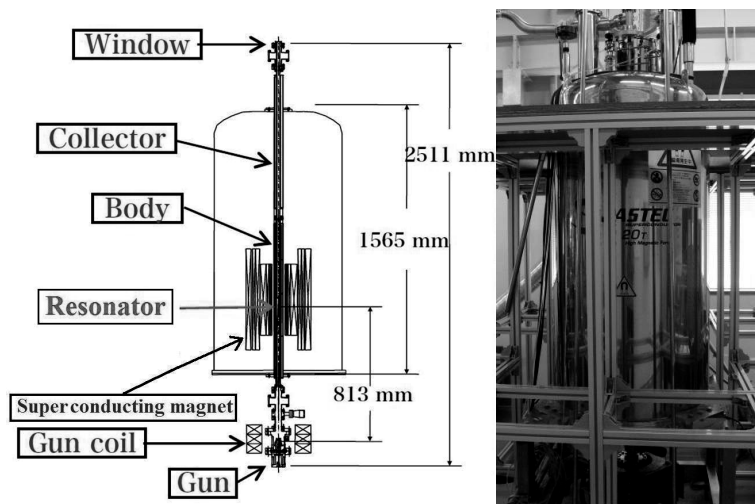


図1 テラヘルツジャイロトロン

ット、ジャイロトロン管、真空窓(サファイア)から構成されている。ジャイロトロン管の中に共振器が設置されている。ジャイロトロン管は、共振器が磁場中心にくるように設置されている。電子銃のエミッティングエリアの半径は 4.5 mm であり、幅 1.8 mm の帯状になっている。

ジャイロトロン管の外径は $\phi 48.5$ mm、長さは出力窓 (Window) から電子銃 (Gun) まで、2511 mm である。ジャイロトロン管は変換フランジ部でサポートを介してクライオスタットに固定されている (図2)。また、厚さ約 40 mm の中心出しフランジによって、ジャイロトロン管が傾かないよう、挟み込むことで固定されており、超伝導コイル軸と管軸が一致している。

1-2 円筒空洞共振器

テラヘルツジャイロトロンで用いる共振器の形状を図3に載せる。共振器の形状は円筒空洞型であり、半径及び長さは、それぞれ 1.95 mm、10 mm である。材料は無酸素銅である。 $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$ はダウンテーパ角度及びアップテーパ角度である。このテーパにより、直管部分に強電場が作られ、電子と電場の相互作用が起こる。共振器の半径は、各発振モードの磁場強度に対する発振間隔が大きくなるように、細くなっている。この共振器により、強磁場領域で発振する可能性があるモードを図3に示す。

赤色は二次高調波発振を示し，黒色は基本波発振をそれぞれ示す。これより，強磁場領域において，二次高調波の単独発振が期待できる領域がいくつか存在することが分かる。共振器の半径は，各発振モードの磁場強度に対する発振間隔が大きくなるように，細くなっている。この共振器により，強磁場領域で発振する可能性があるモードを図 3 に示す。赤色は二次高調波発振を示し，黒色は基本波発振をそれぞれ示す。これより，強磁場領域において，二次高調波の単独発振が期待できる領域がいくつか存在することが分かる。

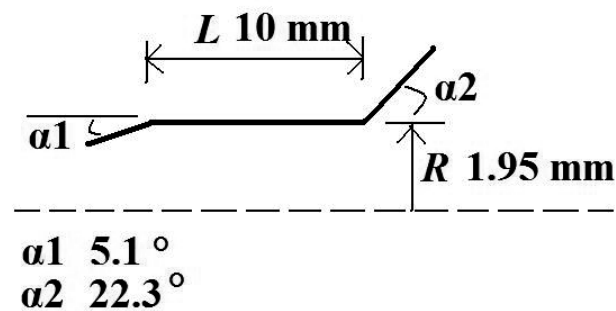


図 2 共振器の形状

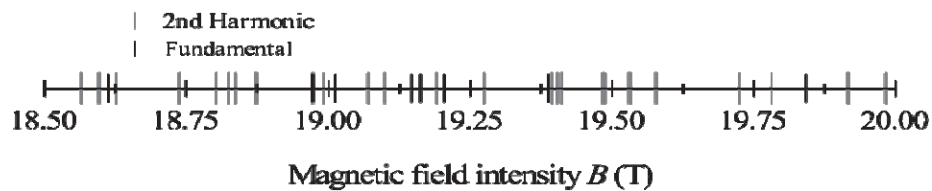


図 3 発振モードの磁場強度依存性

3. 実験結果

3-1 18 T 以下の領域における周波数測定及び出力測定

基本波発振の結果を表 1 にまとめる。二次高調波発振に対して，テロダイン受信系により測定した周波数及び水負荷による出力測定結果を表 2 にまとめる。また，実験

条件は電源設定カソード電圧-18 kV，繰り返し周波数 1 Hz，実効比 10 %（パルス幅 100 ms）で行った。ここで B_0 は磁場強度， I_0 は主磁場コイル電流量， f_{cyclo} は磁場強度に対応する電子サイクロトロン周波数， f_{cal} は共振器周波数， f_{meas} は測定周波数， ΔR は測定周波数から見積もられる共振器半径と設計値($R=1.95$ mm)との差， P は水負荷で測定した出力である。表 1 の出力が空欄の部分は，水負荷による測定ができなかったためである。二次高調波では，最高周波数 670.62 GHz まで測定できた。基本波発振では，18 T 以下の磁場強度において，480.23 GHz の周波数で，出力 20 W を達成した。

表 1 二次高調波発振

mode	B_0 (T)	I_0 (A)	f_{cyclo} (GHz)	f_{cal} (GHz)	f_{meas} (GHz)	ΔR (μ m)	P (W)
3,4	6.53	94.80	353.18	357.32	356.65	3.66	
1,5	6.64	96.46	359.36	363.92	363.40	2.79	5
2,5	7.31	106.10	395.28	400.35	399.61	3.61	
0,5	7.36	106.80	397.89	403.28	402.54	3.58	8
3,5	7.94	115.24	429.33	435.56	434.69	3.90	
3,6	8.04	116.72	434.84	441.19	440.20	4.39	
5,6	10.63	154.37	575.11	582.55	581.50	3.52	6
3,7	10.78	156.50	583.04	590.72	589.72	3.31	6
3,8	12.22	177.49	661.24	669.23	666.98	6.58	
1,9	12.28	178.34	664.41	672.90	670.62	6.63	

表 2 基本波発振

mode	B_0 (T)	I_0 (A)	f_{cyclo} (GHz)	f_{cal} (GHz)	f_{meas} (GHz)	ΔR (μm)	P (W)
0,6,2	17.72	257.35	479.28	481.12	480.23	3.61	21
0,6	17.43	253.13	471.43	480.31	478.61	6.93	19
2,6			0.00	477.62			
4,5	17.06	247.75	461.43	470.04	468.11	8.04	34
6,4	16.59	240.88	448.71	456.35	454.64	7.33	40
1,6	16.04	232.87	433.84	441.19	439.65	6.83	32
3,5	15.81	229.58	427.62	435.56	434.01	6.96	44
5,4	15.40	223.57	416.53	423.82	422.53	5.95	43
2,5	14.55	211.27	393.54	400.35	398.91	7.04	69
4,4	14.22	206.43	384.61	390.91	389.73	5.90	57
6,5	13.42	194.86	362.97	373.90	372.38	7.96	69
1,5	13.18	191.34	356.48	363.92	362.77	6.18	88
3,4	12.98	188.47	351.07	357.32	356.19	6.19	88
5,3	12.46	180.87	337.01	342.65	341.72	5.31	40
0,4	11.81	171.41	319.43	326.27	325.47	4.79	40
2,4	11.68	169.66	315.91	322.60	321.64	5.82	72
4,3	11.29	163.95	305.36	310.63	309.85	4.91	66
1,4	10.44	151.53	282.37	286.92	286.13	5.38	79
3,3	10.10	146.7	273.18	278.13	277.29	5.91	24
0,3	9.05	131.46	244.78	249.39	248.72	5.25	41
2,3	8.84	128.43	239.10	244.42	243.70	5.76	101
1,3	7.60	110.34	205.56	209.50	208.90	5.60	113
0,2	6.28	91.19	169.86	172.42	172.00	4.76	16
2,2	5.96	86.58	161.20	164.87	164.28	7.00	52

3-2 テラヘルツ発振が望める領域における発振出力の磁場強度依存性

次に 18 T 以上の磁場強度領域における発振出力の磁場強度依存性について図 4 に示す。図の上段は各モードの発振開始電流，中段は焦電型検出器を用いて測定し，下段はハイパスフィルター $\phi 0.3$ (カットオフ周波数 ~ 585 GHz) を用いることにて，基本

波発振を遮断して測定した結果である。実験条件は電源設定カソード電圧 18 kV, ビーム電流量~370 mA, 繰り返し周波数 5 Hz, 実効比 10 %, コイルの温度上昇を抑えるため, 掃引速度 2 A/min で 18 T (261.34 A) から 20 T (290.34 A) の範囲で掃引した。

図下段の 19.25T 強に出力を観測することができた。この磁場強度において, 発振が可能な二次高調波モードは, $TE_{1,14}$, $TE_{3,13}$, $TE_{12,9}$, $TE_{20,6}$, $TE_{23,5}$, $TE_{30,3}$ があるが, $TE_{20,6}$, $TE_{23,5}$, $TE_{30,3}$ は入射半径が比較的大きいところ (約 0.9 mm 以上) で発振が起こる。現在のジャイロトロン管設置条件や, 実験条件での磁力線計算では, 入射半径は約 0.51 mm である。であるからして, $TE_{20,6}$, $TE_{23,5}$, $TE_{30,3}$ のモードの発振が起こることは考えにくい。そのため, 19.25 T 強に得られた出力は $TE_{1,14}$ または $TE_{3,13}$ の二次高調波発振の可能性が高いといえる。これらのモードの低磁場側には $TE_{11,3}$ モード, 高磁場側には $TE_{6,5}$ モードの基本波発振があり, 図中段の結果をみると, それらの発振が 19.0 T 強と 19.5 T 弱の磁場強度にて観測できている。これら 2 つのモードの間の 19.25 T 強の磁場強度に信号強度は小さいが, 出力が観測できている。この出力は下段のハイパスフィルターを通した測定でも観測されている。 $TE_{11,3}$ モードと $TE_{6,5}$ モードの間には基本波発振は存在しないので, 19.25 T 強の磁場強度に観測された出力は二次高調波発振の可能性がきわめて高い。また, 18 T 強, 18.5 T 付近にも小さいが発振を確認できた。これらの発振も二次高調波発振の可能性はあるものの, 基本波発振との競合発振になっている可能性がある。18.25 T から 18.5T 弱, 18.5 T 強から 19 T, 19.5 T から 20 T 弱に見られるブロードな山は, 基本波発振の漏れと考えられる。20 T 弱にある縦線は基本波発振のである。これは, 基本波発振の周波数がハイパスフィルターのカットオフ周波数よりも高くなり, 出力完全に透過したためである。

4. 結論

20 T 超伝導マグネットを用いたジャイロトロン (テラヘルツジャイロトロン) を用いて, 光源を目指した高周波を行った。

- ・ヘテロダイン受信系を用いた周波数測定及び水負荷を用いた出力測定を行い, 10 個の二次高調波発振モードの同定を行うことができた。最高周波数として 690 GHz の発振を TE_{19} モードを達成した。また, 出力測定ではどの発振においても, 数 Watt 以下であることが確認できた。

- ・低磁場領域でのジャイロトロンの動作条件をもちいて, テラヘルツ領域の磁場強度にて磁場掃引しながら発振を探索した。その結果, 基本波発振モードの間の 19.25 T

付近に二次高調波発振と考え得る出力を観測できた。この出力はハイパスフィルターを用いた測定においても観測できた。磁場強度を考えると、観測された発振は 1 THz を超える発振であると考えられる。

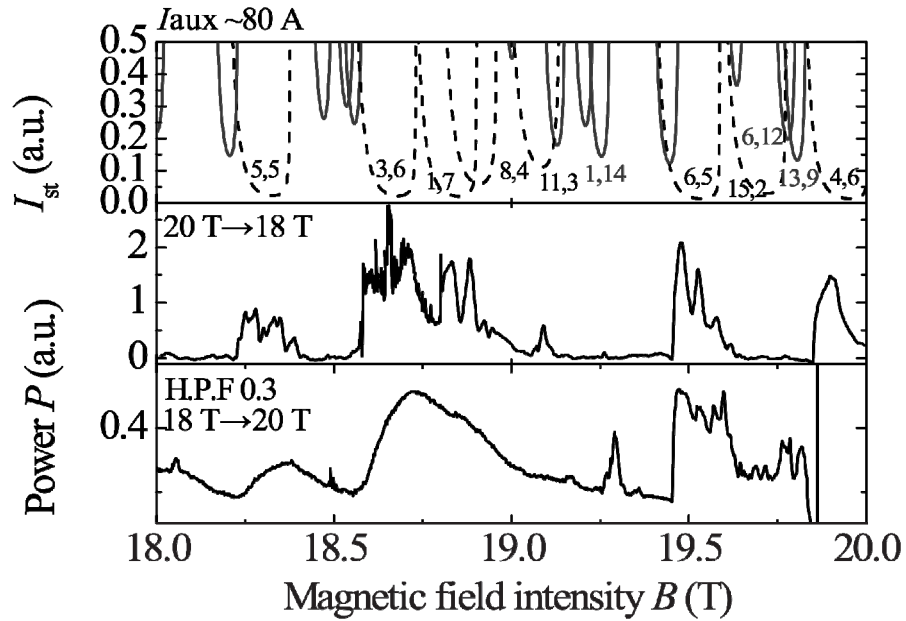


図 4 18 T 以上の磁場領域における発振出力の磁場強度依存性

参考文献

- [1]立松 芳典, 齊藤 輝雄, J. Plasma Fusion Res. Vol2, 855-860 (2008)
- [2]Vikram S. Bajaj, Melissa K. Hornstein *et.al*, Journal of Magnetic Resonance 189, 251-279 (2007)
- [3]中山 和也, 博士論文 「核融合プラズマ計測用短波長遠赤レーザー計測システムの開発に関する研究」 (2003)
- [4]梶原 健, IEICE Technical Report, ED2007-141, 27-31 (2008)
- [5]清水 義弘, 博士論文「サイクロトロン高次高調波動作を用いたジャイロトロンの高周波化」, 111-120 (1996)
- [6]土屋 博崇, 遠赤外領域開発研究センター年報 第 7 巻, 15-33 (2006)

- [7]T.Idehara, H. Tsuchiya, *et.al*, Int. J. Infrared and millimeter waves
Vol.27, 319- 331 (2006)
- [8]M.Yu. Glyavin, A.G. Luchinin and G.Yu. Golubiatnikov, Physical Review
Letters 100, 15101-1 - 15101-3 (2008)
- [9]Mikhail Yu. Glyavin, Alexey G. luchinin, Terahertz Science and Technology
Vol.2, 150-155 (2009)
- [10]T. Idehara, I. Ogawaw, *et.al*, J. Plasma Fusion Res Vol.8, 1508-1511
(2009)
- [11]La Agusu, T. Idehara, 遠赤外領域開発研究センター年報 第8巻, 26-43
(2007)
- [12]森 秀明, 修士論文「高磁場マグネットを用いたテラヘルツジャイロトロンの開
発」 50-86 (2008)